

# 中国东部植被物候变化及其对气候的响应

侯美亭<sup>1</sup> 延晓冬<sup>2</sup>

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

**摘要:** 使用1982—2006年的GIMMS NDVI数据, 基于TIMESAT程序, 提取并分析了中国东部不同土地利用类型植被的物候(生长开始期、生长结束期和生长季长度)变化特征及其对气候的响应。获得以下结论:(1)各土地类型植被的NDVI变化都具有明显的季节规律。自然植被的NDVI年变化曲线表现出显著的单峰型。而农业植被的NDVI年变化曲线表现出双峰, 第一个峰值一般出现在5月份, 第二个峰值大约出现在8月份;(2)农业植被的生长开始期一般要早于自然植被;(3)1982—2006年间, 林地的生长季长度延长了 $11.3\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ; 草地的生长开始期提前了 $6.4\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ , 生长季长度延长了 $7.2\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ; 有灌溉旱地的生长开始期提前了 $5.8\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ , 生长结束期提前了 $11.6\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。引起植被物候发生显著变化的主要气候因素是气温, 降水的作用不明显。

**关键词:** 物候变化, 气候, 生长季, 中国东部

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.04.006

## Detecting Vegetation Phenological Changes in Response to Climate in Eastern China

Hou Meiting<sup>1</sup>, Yan Xiaodong<sup>2</sup>

(1 CMA Training Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract:** In this study, the software TIMESAT was used to generate smooth time series of GIMMS NDVI as well as to estimate the vegetation phenological parameters for eastern China from 1982 to 2006. Results show that the significant positive trends were observed for the length of the growing season for the forest land and grassland. The start of the growing season (SGS) has been advanced for the grassland and irrigated cropland, and the end of the growing season has also been moved up for the irrigated cropland. The temperature plays a key role in influencing these phenological changes for different vegetation types, while the effect of precipitation is obviously not observed. For example, the SGS for the grassland correlates strongly with the temperature of the preceding month (March) of the SGS, and the SGS for the irrigated cropland is greatly affected by the temperature of the month (February) of the SGS.

**Key Word:** phenological changes, climate, growing season, eastern China

### 1 引言

植被物候反映了植被生长发育的季节循环以及植物物种和群落在利用资源过程中形成的生理和形态学特征<sup>[1]</sup>。准确地监测和模拟植被物候变化, 是研究生态系统响应于环境和气候变化的有用工具<sup>[2,3]</sup>。

全球许多区域的植被物候已经受到了气候变化的影响<sup>[4]</sup>。例如, 在欧洲, 过去40年间, 春季的开始提前了 $2\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ , 秋季的开始大约延迟了 $1.5\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ <sup>[5,6]</sup>。类似的生长季开始时间提前、生长季持续时间延长等现象在亚洲<sup>[7,8]</sup>、澳大利亚<sup>[9]</sup>和北美<sup>[10,11]</sup>等区域都有发生。

目前, 已有一些研究利用遥感数据分析了中国不

同区域的植被物候变化。例如, Piao等<sup>[12]</sup>使用1982—1999年间的GIMMS NDVI数据研究了中国温带区域(大致 $30^{\circ}\text{N}$ 以北)的植被物候变化。Zeng等<sup>[13]</sup>使用1982—2003年间的GIMMS NDVI数据分析了柴达木盆地植被生长季NDVI对于气候变暖的响应。国志兴等<sup>[14]</sup>使用1982—2003年间的GIMMS NDVI数据分析了中国东北地区不同植被物候期的变化趋势。宋春桥等<sup>[15]</sup>基于2001—2010年的MODIS EVI数据研究了藏北高原植被物候与气候变化的关系。而专门针对中国东部区域的研究相对较少。

本研究使用1982—2006年的GIMMS NDVI数据, 选取生长开始期(Start of the Growing Season, SGS)、生长结束期(End of the Growing Season, EGS)和生长季长度(Length of the Growing Season, LGS)等对气候变化尤为敏感的三种物候参数, 分析

收稿日期: 2012年4月9日; 修回日期: 2012年5月3日  
第一作者: 侯美亭(1982-), E-mail: hmt567@gmail.com

中国东部不同植被类型的物候变化特征及其对气候的响应。

## 2 基于遥感的植被物候数据提取

### 2.1 植被物候参数介绍

植被物候参数一般可定义为植物生命循环过程中某些特定事件（例如发芽、开花、成熟、落叶等）的发生或持续时间。植被物候参数的获取主要基于两种不同的途径：地面观测和遥感反演<sup>[16]</sup>。地面观测得到的物候参数具有较高的时间分辨率和与物种有关的细节信息，但其空间代表性通常较差<sup>[17, 18]</sup>。遥感反演尽管一般很难直接得到如地面观测获取的物候的细节信息，但其具备高的空间覆盖能力，使得研究者可以在区域或全球尺度上研究物候事件，而这种尺度更接近于气候变化的研究尺度。

基于遥感生成的NDVI时间序列数据是目前研究常用的物候数据源，可以获取与植被生长发育有关的某些重要物候参数，例如生长季的开始时间、结束时间和生长季长度<sup>[19]</sup>。表1列举了通过不同统计方法从NDVI中提取的有关的植被物候参数<sup>[20]</sup>，利用这些物候参数，可有效地将NDVI与植被本身的生物学特征联系起来。

在表1所出示的各种植被物候参数中，生长开始期和生长结束期这两种参数尤其受到了研究者的普遍关注。受全球变暖影响，植被的生长开始期普遍提前，结束时间有所推迟<sup>[28, 29]</sup>。

### 2.2 TIMESAT——植被物候分析程序介绍

遥感数据不可避免地受到云、气溶胶等噪声的干扰，尽管最大值合成方法在一定程度上消除了噪声，但是随选取的合成天数的增加，也会导致有用的物候信息丢失。另外，遥感获取的NDVI一般基于离散的时间点，而真实的NDVI是连续的数据，在目前的技术手段下利用遥感直接获取连续的NDVI数据是不太可能的。因此，在使用NDVI数据提取物候信息之前，必须对其进行降噪及拟合处理<sup>[30]</sup>。然后，使用NDVI拟合曲线获取物候参数是比较适宜的方法。

Jönsson等<sup>[31, 32]</sup>给出了一套可以方便提取植被物候信息的程序——TIMESAT，该程序可从<http://www.nateko.lu.se/TIMESAT/timesat.asp>获取。TIMESAT程序使用了三种不同的最小二乘方法对NDVI时间序列数据进行降噪和拟合处理：Savitzky-Golay滤波法、不对称高斯函数法以及双logistic函数法。与BISE方法<sup>[33]</sup>、傅里叶分析<sup>[34]</sup>等方法相比，不对称高斯函数法和Savitzky-Golay滤波法能够更可靠地获取NDVI时间序列，非常适用于物候学研究<sup>[31]</sup>。

### 2.2.1 降噪及拟合方法

#### 1) Savitzky-Golay滤波法

Savitzky-Golay滤波是Savitzky等<sup>[35]</sup>提出的基于多项式最小二乘拟合的一种数据平滑方法，可以将其理解一种加权滑动平均滤波，其权重取决于在一个滤波窗口范围内做多项式最小二乘拟合的多项式次数。这种滤波方法适用于任何具备相同间隔的数据，NDVI时间序列显然满足该条件。

NDVI时间序列的Savitzky-Golay滤波公式一般可以用下式描述<sup>[36]</sup>：

$$y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} c_i y_{j+i}}{n} \quad (1)$$

式中， $y_j^*$ 是NDVI拟合值； $y_{j+i}$ 是NDVI原始值； $c_i$ 是对滑动窗口内第*i*个NDVI值进行多项式最小二乘拟合时给定的系数； $n$ 是卷积数，其大小等于滑动窗口的尺寸，即 $2m+1$ ，表示滑动窗口包含了 $2m+1$ 个点； $j$ 是滑动窗口内纵向上原始数据的滑动指数。

对NDVI时间序列数据使用Savitzky-Golay滤波时，有两个参数要根据NDVI原始值来确定。第一个参数是 $m$ ，通常 $m$ 值越大，平滑效果越明显；第二个值是用来拟合的多项式函数的次数，该次数一般在2~4之间，较低的次数可以得到更平滑的结果，但可能会引起偏差，较高的次数可以减少拟合偏差，但也可能会产生更多噪声。

#### 2) 不对称高斯函数和双logistic函数法

同Savitzky-Golay滤波相比，不对称高斯函数和双logistic函数这两种方法不是对某滑动窗口内的值进行拟合，而是对极值周围的数据点利用局部函数进行拟合。局部函数一般如下式所述：

$$f(t) \equiv f(t; c, x) = c_1 + c_2 g(t; x) \quad (2)$$

式中线性参数 $c=(c_1, c_2)$ 决定了拟合函数的基线和振幅，非线性参数 $x=(x_1, x_2, \dots, x_p)$ 决定了函数 $g(t; x)$ 的形状。参数 $c$ 和 $x$ 的确定方法见文献<sup>[31]</sup>。

表1 基于NDVI的一些植被物候参数

参数	定义或计算方法	生物学意义	应用举例
NDVI 最大值	给定时段内的NDVI的最高值	表示某时段内植被生长的最佳状态	[21]
NDVI 时间积分	给定时段内的NDVI值的总和；或NDVI对时间的积分	表示植被某时段内的生产力	[22, 23]
NDVI 年变化幅度	(NDVI年最大值-NDVI年最小值)/NDVI年积分	用来比较植被生物量的年际动态	[24]
生长季长度	利用NDVI阈值判定；表示生长季开始或结束日期之间的天数	代表食物（对于植食性动物）可利用的天数	[25]
生长季开始或结束期	利用阈值或滑动平均方法来估计	每年植物生长的开始或结束	[26]
NDVI增长/下降速率	两个给定时期的NDVI间的斜率，NDVI时间序列的logistic拟合曲线的斜率	植物生长或凋落的速率	[27]

使用不对称高斯函数进行拟合时，函数 $g(t; x)$ 可表示为：

$$g(t; x_1, x_2, L, x_3, x_4) = \begin{cases} \exp[-\frac{(t-x_1)^{x_3}}{x_2}] & t > x_1 \\ \exp[-\frac{(x_1-t)^{x_3}}{x_4}] & t < x_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中， $x_1$ 为极值所处的时间点； $x_2$ 和 $x_3$ 决定了高斯函数右半边的宽度和扁平度； $x_4$ 和 $x_3$ 决定了高斯函数左半边的宽度和扁平度。

使用双logistic函数进行拟合时，函数 $g(t; x)$ 可表示为：

$$g(t; x_1, \dots, x_4) = \frac{1}{1 + \exp(\frac{x_1 - t}{x_2})} - \frac{1}{1 + \exp(\frac{x_3 - t}{x_4})} \quad (4)$$

式中， $x_1$ 和 $x_2$ 决定了曲线左半边的突变点的位置和变化速率； $x_3$ 和 $x_4$ 决定了右半边的突变点的位置和变化速率。

局部函数在极值周围的拟合效果较好，在远离极值的部分，拟合效果较差。假定 $f_L(t)$ ， $f_C(t)$ ， $f_R(t)$ 分别为左端最小值、中间最大值和右端最小值的NDVI变化的拟合函数，则用于拟合整个间隔 $[t_L, t_R]$ 内NDVI变化的全局函数 $F(t)$ 可表示为：

$$F(t) = \begin{cases} \alpha(t)f_L(t) + [1 - \alpha(t)]f_C(t) & t_L < t < t_C \\ \beta(t)f_C(t) + [1 - \beta(t)]f_R(t) & t_C < t < t_R \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 分别是用于平滑的距离系数，取值在0~1之间。

### 2.2.2 植被物候参数的判定

图1示出了TIMESAT可以提取的9种物候参数，以a~i表示，分别为：a. 生长季开始时间，定义为当NDVI增加至拟合函数的左半部分NDVI振幅的某个百分比（如10%）时的时刻；b. 生长季结束时间，定义为NDVI降低至拟合函数的右半部分NDVI振幅的某个百分比时的时刻；c. NDVI增至左半部分NDVI振幅的90%的时刻；d. NDVI降至右半部分NDVI振幅的90%的时刻；e. NDVI峰值期；f. 生长季振幅，定义为NDVI峰值与左半部分最小值和右半部分最小值的均

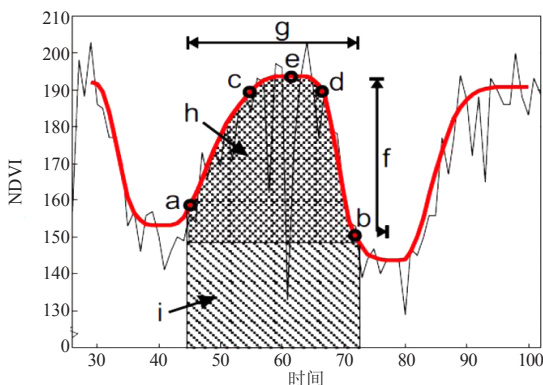


图1 TIMESAT提取的不同物候参数<sup>[32]</sup>

值之间的差值；g. 生长季长度；h. 生长季NDVI活跃累积量，为NDVI拟合曲线与左半部分最小值和右半部分最小值的均值之间的区域；i. 生长季NDVI总累积量，为NDVI拟合曲线和0值之间的全部区域。对于常绿林而言，生长季NDVI活跃累积量可能是小的，但总累积量可能很大。

## 3 数据和方法

### 3.1 研究区域选取

本研究中的中国东部指包括北京、天津、河北、河南、山东、安徽、江苏、上海、浙江、湖北、湖南、江西、广东、福建在内的十四个省市（图2）。该研究区域地处东亚季风气候区，植被生长受季风气候的影响非常明显，气候类型多样，从北至南覆盖了温度到亚热带的不同气候带，而且，该区域人类活动尤为活跃，这也使得其植被物候的变化对气候的响应更为复杂。

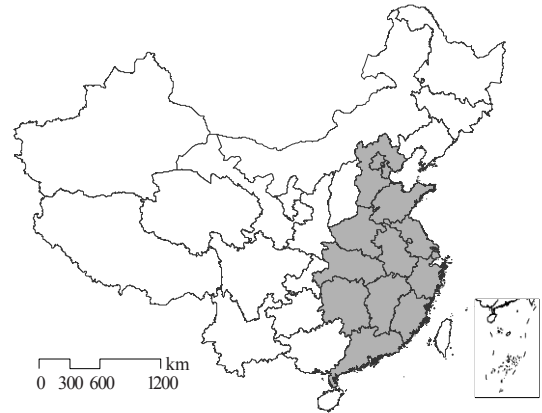


图2 本研究选取的中国东部区域范围（阴影部分）

### 3.2 植被和气候数据

本研究使用的植被数据为目前具有最长时间跨度（1981年7月—2006年12月）的遥感植被指数数据集——GIMMS，该数据来源于NOAA-7/9/11/14/16和17等一系列卫星所搭载的AVHRR传感器。GIMMS数据可从ftp://ftp.glc.f.umd.edu/glc/f/GIMMS/ 获取。

GIMMS数据是由15天最大值合成（MVC）得到的，空间分辨率为8km。MVC方法很大程度上去除了云对NDVI的影响，也在一定程度上减少了水汽吸收的影响，因为水汽吸收的增加会导致NDVI低于真值。GIMMS数据已广泛用于不同区域的植被物候研究<sup>[20]</sup>。

使用的气候数据为经过质量控制的气温和降水月值数据，来源于中国气象科学数据共享服务网（http://cdc.cma.gov.cn/）。

### 3.3 方法

#### 3.3.1 本研究使用的NDVI数据拟合方法

首先，基于2000—2003年间GIMMS NDVI的15

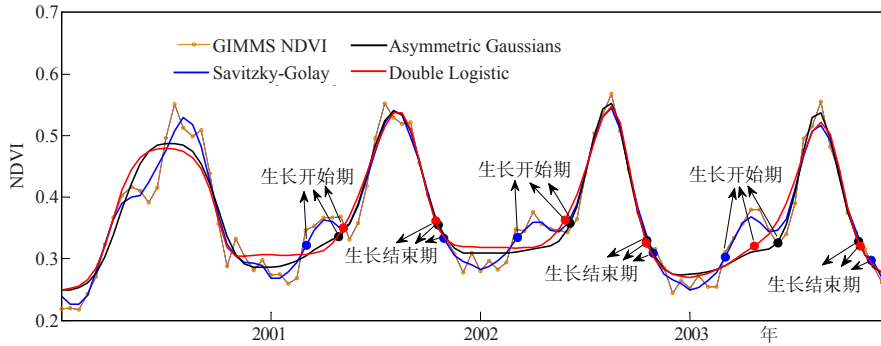


图3 TIMESAT中不同拟合方法的效果对比

天合成数据，提取了中国东部水田的NDVI变化曲线（图3），可以发现，每一年的NDVI都有两个波峰，第一个波峰明显低于第二个波峰。第一个波峰一般代表了冬播作物的最旺盛生长期，第二个波峰一般代表了夏播作物的最旺盛生长期。

然后，通过TIMESAT程序分别使用Savitzky-Golay滤波、不对称高斯函数及双logistic函数法对原始NDVI序列进行了拟合（图3）。可以发现，三种方法相比，双logistic函数的拟合曲线最为平滑，其次为不对称高斯函数，而Savitzky-Golay滤波得到的拟合曲线最接近原始的NDVI序列。Fontana等<sup>[37]</sup>也发现Savitzky-Golay滤波更能灵敏地反映NDVI的微小变化。

由图3也可以看出，对于生长结束期的判定，三种方法基本上是一致的。对于生长开始期的判定，不对称高斯函数及双logistic函数法表现出明显的偏差：在2001年，不对称高斯函数和双logistic函数拟合得到的生长开始期的NDVI值已经偏后于NDVI的第一个波峰，这显然不符合生长开始期的定义；在2002年，不对称高斯函数和双logistic函数得到的生长开始期基本一致，但它们拟合的生长开始期接近了两个波峰之间的波谷部分；在2003年，双logistic函数得到的生长开始期大约正好位于当年NDVI的一个波峰，不对称高斯函数拟合的生长开始期依然接近两个波峰之间的波谷。相比而言，Savitzky-Golay得到的生长开始期比较符合实际。

因此，本研究选取了Savitzky-Golay滤波法对原始NDVI数据进行拟合并提取相应的物候参数。

### 3.3.2 植被物候对气候变化响应的分析方法

使用相关方法分析了发生显著变化的物候参数与气温和降水的关系，以寻找引起这些变化的可能原因。由于植被生长对于气候变化的响应一般会存在一定的时间滞后，在分析特定的物候参数与气候的相关关系时，本研究参考了Piao等<sup>[12]</sup>的方法，使用所分析物候参数的前期时段的平均气温和累积降水作为对其产生影响的可能因素。某物候参数前期时段定义为该

物候参数发生时间与上一物候参数发生时间之间的时间间隔，这样，生长开始期的前期时段定义为它与上一个生长结束期之间的时间间隔，生长结束期的前期时段定义为它与在前的生长开始期之间的时间间隔，影响生长季长度变化的前期时段定位为生长结束期前的一个完整年。

## 4 结果

### 4.1 不同土地利用类型植被 NDVI 年内变化特征

为去除土地利用变化对植被带来的影响，利用20世纪70年代末植被数据图集<sup>[38]</sup>、1990和2005年中国1km格网土地利用数据集<sup>[39]</sup>等三个不同时段的数据（它们反映了近几十年来土地利用变化的大体特征），通过叠加分析，找出土地利用未发生变化的区域。然后，选取位于土地利用未发生变化区域的气象站点，如图4所示，这些气象站点所属的土地利用类型包括林地、农田（无灌溉旱地、有灌溉旱地、水田）、草地等几大类。

由于中国1km格网土地利用数据集未将灌溉区域单独提取出来，而灌溉很大程度上减弱了植被对气候尤其是降水变化响应的敏感程度。因此，本研究参考

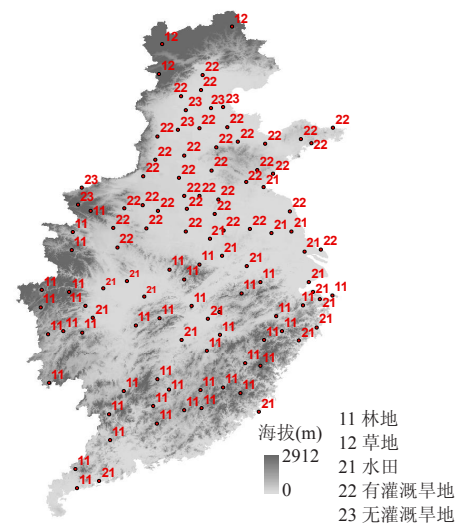


图4 不同土地利用类型的气象站点的空间分布

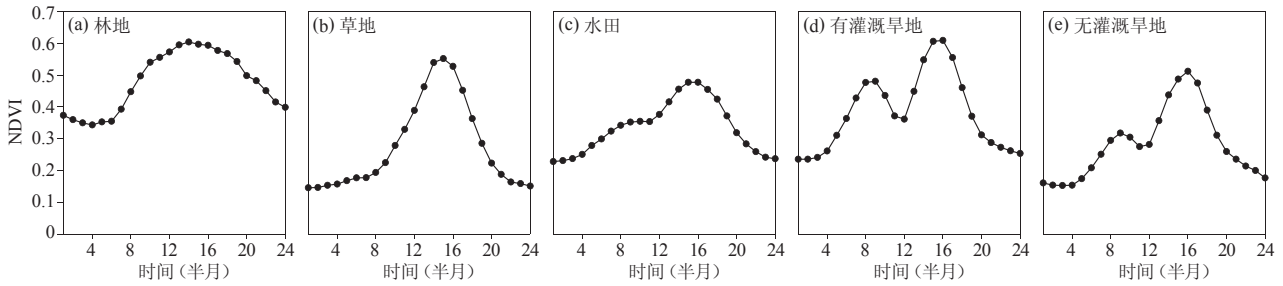


图5 不同土地利用类型植被NDVI的年内变化趋势

了生成于1992—1993年间的USGS全球土地覆盖数据集<sup>[40, 41]</sup>, 该数据集将灌溉农田单独分为一种类型, 其分辨率也为1km。根据统计数据 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsjs/>), 自20世纪90年代至今, 中国东部的有效灌溉面积虽有所增加, 但是变化幅度不大, 而80年代的灌溉数据难以获取, 故直接利用USGS全球土地覆盖数据集所划分的灌溉区域, 作为本研究中灌溉区域的划分标准。

基于1982—2006年间15天最大值合成的GIMMS NDVI数据, 以图4中的气象站点为中心, 提取24km×24km内的所有像元NDVI值并进行平均, 即得到不同土地利用类型下的植被NDVI特征。然后, 计算不同植被类型站点历年同期的NDVI平均值, 再将相同植被类型的NDVI进行平均, 得到了各类型植被的NDVI年内变化曲线(图5)。可以发现, 林地、水田等主要分布于淮河、长江以南区域的植被的NDVI年内变化幅度较缓: 林地NDVI的年内变化大约在0.3~0.6之间, 且一年中近2/3时间的NDVI值都在0.4以上; 水田NDVI的年内变化在0.2~0.5之间, 一年中仅1/3时间的NDVI值在0.4以上。同南部区域的植被相比, 北部区域植被NDVI的年内变化幅度较大: 草地NDVI的变化幅度最大, 约在0.1~0.6之间, 一年中约一半时间的NDVI值在0.3以上; 有灌溉旱地次之, NDVI变化在0.2~0.6之间, 一年中约2/3时间的NDVI值在0.3以上; 无灌溉旱地的NDVI变化在0.1~0.5之间, 一年中约一半时间的NDVI值在0.3以上。

从图5可以看出的另一个明显特点是各植被的季节变化规律, 这也是进一步分析植被物候特征的一个重要前提。可以发现, 林地、草地等自然植被的NDVI年内变化具有很明显的季节特征: 林地的NDVI在冬季末期(2月末)达到最低值, 草地的NDVI在晚秋至早春期间一直处于低值; 而在一年中温度和降水条件最好的夏季, 二者的NDVI都达到了最高值, 两类植被NDVI的年内变化曲线都呈现出显著的单峰型。与自然植被形成明显区别的是, 水田、旱地等农业植被的NDVI大约在5月末至6月初左右有一个明显的下降, 这种现象在有灌溉旱地上表现的尤为突出,

显然, 这是由于农作物的收获引起的: 主要分布于华北平原的有灌溉旱地的种植结构以冬小麦—夏玉米轮作为主, 6月初小麦的收割导致了其NDVI明显的下降。

## 4.2 植被物候的年际变化特征

尽管农业植被在早夏期间由于作物收获等农业活动导致了NDVI的下降, 但这种下降幅度同NDVI在冬夏两季的差异相比相对较小(图5d和5e)。因此, 本研究在定义生长季, 以及利用TIMESAT判别生长开始期和结束期时, 未单独考虑夏季收获对NDVI造成的影响, 这样, 自然植被和农业植被都将被认为一年具有一个生长季。生长开始期和结束期的判定, 使用了在国内外研究中多被采用的20%的动态阈值方法<sup>[19, 42]</sup>。

图6显示了利用TIMESAT获取的不同土地类型植被NDVI的拟合曲线。可以看出, Savitzky-Golay滤波得到的各类型植被NDVI的拟合曲线与原始的NDVI序列相当一致。

根据TIMESAT拟合得到的结果, 图7和图8分别显示了各土地利用类型植被生长开始期、结束期和生长季长度的年际变化趋势, 表2和表3分别给出了不同土地利用类型各物候参数的多年平均值和变化率。

由表2可以看出, 农业植被的生长开始期一般要早于自然植被, 水田和旱地的生长开始期多在2月末至3月中旬, 林地的生长开始期多位于3月末, 草地的

表2 1982—2006年间不同土地利用类型植被物候参数的平均值

	林地	草地	水田	有灌溉旱地	无灌溉旱地
生长开始期	89	115	57	57	78
生长结束期	338	284	305	292	310
生长季长度	252	169	248	234	231

表3 不同土地利用类型植被物候参数年际变化的线性倾向率(1982—2006年)

	生长开始期 $d \cdot (10a)^{-1}$	生长结束期 $d \cdot (10a)^{-1}$	生长季长度 $d \cdot (10a)^{-1}$
林地	-4.5	6.8	11.3*
草地	-6.4*	0.8	7.2*
水田	0.9	-3.5	-4.4
有灌溉旱地	-5.8**	-11.6**	-5.8
无灌溉旱地	-5.3	-4.1	1.2

注: \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$

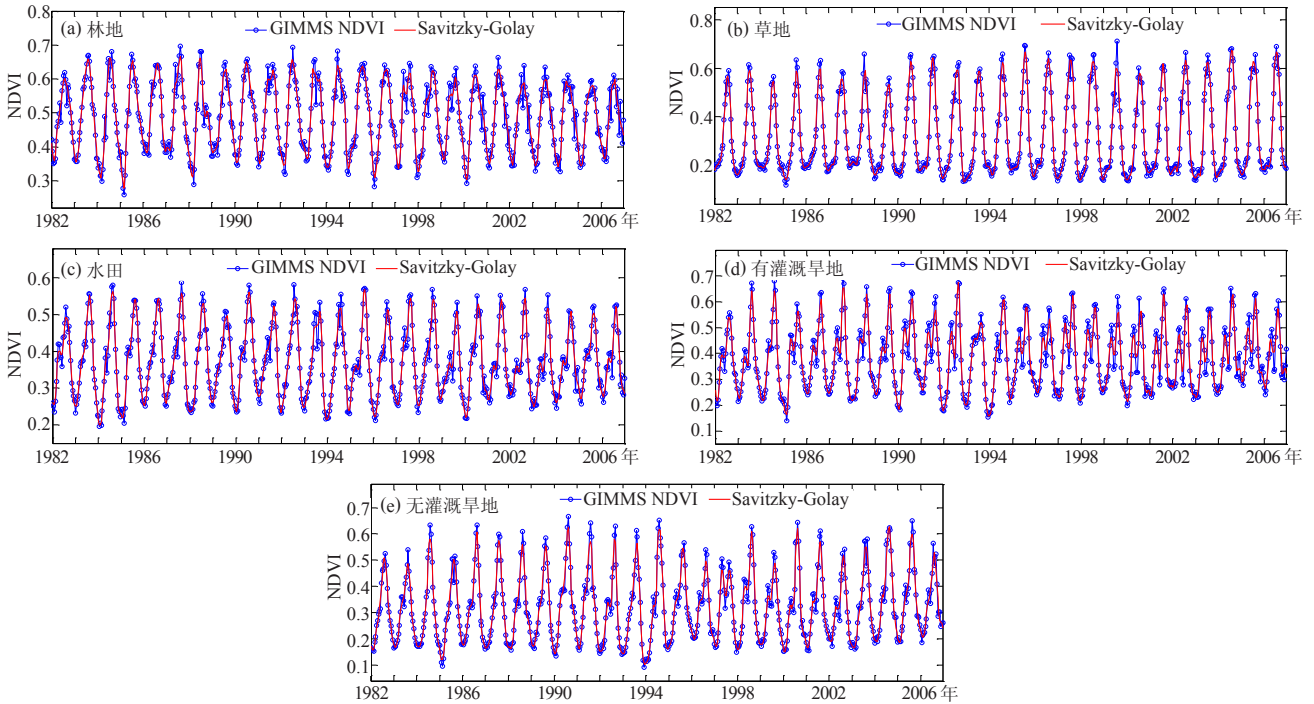


图6 不同土地利用类型植被NDVI的原始序列（蓝色）及拟合曲线（红色）

生长开始期一般在4月中旬左右。自然植被的生长结束期表现出显著的地域差异，草地由于主要分布于河北西北部，秋冬季来临的较早，其生长结束期也是5种土地利用类型中最早的，多在10月初，其生长季长度也是最短的，约为5个多月；林地的生长结束期是各土地利用类型中最晚的，多在12月初左右，其生长季长度也是最长的，多数年份都在250天以上。农业植被的生长结束期一般位于10月末，生长季长度也相对较长，多在230到250天左右。

尽管不同土地利用类型植被的各种物候参数都出现了上升或下降的变化趋势（图7和8），但是，仅有3种土地利用类型（林地、草地和有灌溉旱地）的部分物候参数的变化通过了0.05或0.01的

显著性水平的检验，分别为：林地的生长季长度增加（ $11.3d \cdot (10a)^{-1}$ ）；草地的生长开始期提前（ $6.4d \cdot (10a)^{-1}$ ），生长季长度增加（ $7.2d \cdot (10a)^{-1}$ ）；有灌溉旱地的生长开始期提前（ $5.8d \cdot (10a)^{-1}$ ），生长结束期提前（ $11.6d \cdot (10a)^{-1}$ ）。

### 4.3 对气候变化的响应

图9出示了生长开始期发生显著变化的两种土地利用类型草地、有灌溉旱地对气温和降水的响应。可以发现，引起两种土地类型生长开始期发生变化的因素主要为气温，降水的作用并不明显。其中，草地生长开始期的变化主要受到了开始期的前一个月（即3月）平均气温的影响，相关系数为 $-0.59$ （ $p < 0.01$ ），而开始期当月的平均气温与生长开始期的相关并不

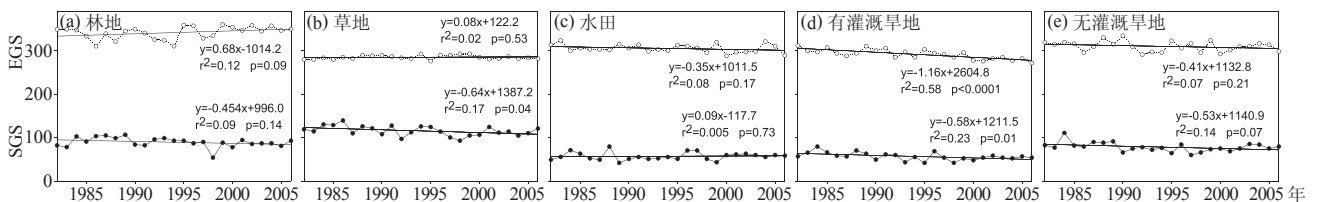


图7 不同土地利用类型植被生长开始期（SGS）、结束期（EGS）的年度变化趋势

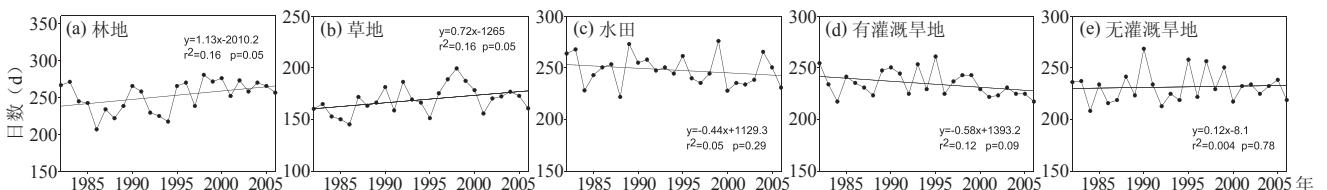


图8 不同土地利用类型植被生长季长度的年度变化趋势

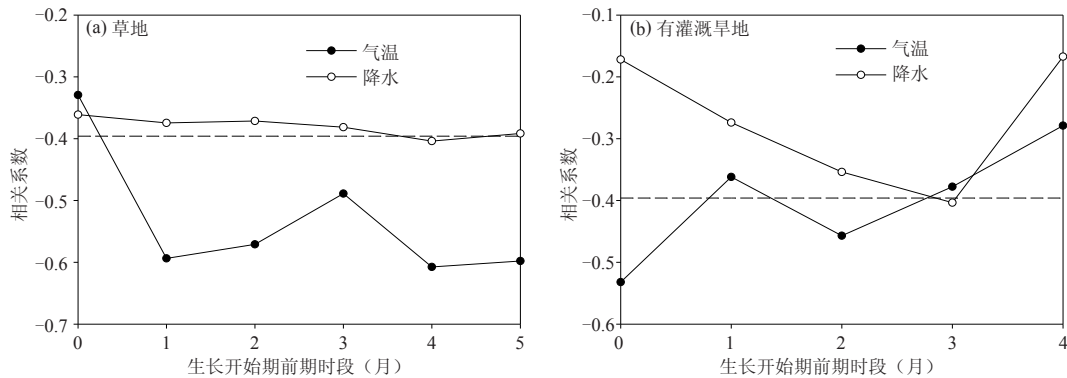


图9 生长开始期与气温、降水的关系 (虚线表示0.05显著性水平)

显著,表示引起生长开始期显著提前的决定因素为3月气温的上升。有灌溉旱地生长开始期的变化主要受到了生长开始期当月(2月)气温的影响,相关系数为-0.53 ( $p < 0.01$ ),2月一般为冬小麦的返青时期,该月的气温上升会引起返青的明显提前。

生长结束期发生显著变化的土地类型为有灌溉旱地。由图10可以发现,与结束期呈显著相关的主要是结束期前第1到6个月(即3—8月)的气温,而且随月份的提前相关变得越发显著,这说明导致生长结束期提前的主要原因可能是生长开始期初期气温的上升。

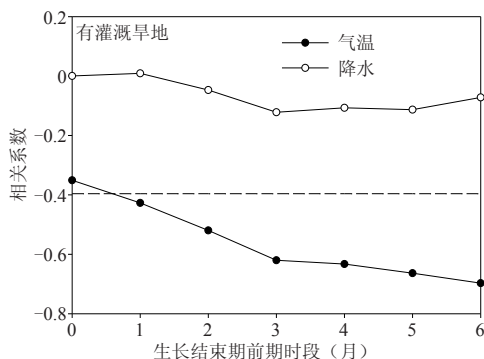


图10 生长结束期与气温、降水的关系 (虚线表示0.05显著性水平)

然而,需要指出的是,本研究定义了有灌溉旱地只有一个生长季,实际上,主要分布于华北平原的有灌溉旱地的作物种植类型包括了冬播和夏播作物两类,得到的生长结束期实际上是夏播作物的生长结束期。因此,3—5月的气温升高可能首先使得冬播作物的生长结束期提前,进一步使得夏播作物的播种期提前,再加上夏季气温的作用两种因素导致了拟合的生长结束期的提前。

生长季长度发生显著变化的植被类型为林地、草地,图11给出了这两种植被生长季长度与气温和降水的关系。可以发现,对于这两种植被,降水的作用依然不明显,气温是影响生长季长度变化的关键因素。

尽管林地生长开始期与结束期的变化未通过显著

性检验(表3),但作为生长结束期和开始期的区间长度,生长季长度表现出了明显增加。图11a显示,林地生长结束期前的第3(约为9月)至第11个月(约为1月)的气温的变化都与生长季长度呈现出显著相关。这表明,对于林地而言,除了秋季以外,其余季节的气温变化都会明显对其生长季长度造成影响。

影响草地生长季长度的主要因素为其生长结束期前的第7(约为3月)至第11个月(约为前一年的11月)的气温(图11b)。这个时期正好位于草地生长开始期前,而且时间越提前,相关程度一般越高,这说明冬季及早春季的温度变化是决定其生长季长度变化的首要原因。就整个中国东部来看,本研究中的草地所在的区域正是冬春季升温特别明显的区域之一<sup>[43]</sup>,这显然是影响其植被物候变化的关键因素。

## 5 结论

使用1982—2006年的GIMMS NDVI数据,基于TIMESAT程序,选取Savitzky-Golay滤波法,提取并分析了中国东部不同土地利用类型植被的物候(生长开始期、生长结束期和生长季长度)变化特征及其对气候的响应。获得以下结论:

(1) 各土地类型植被的NDVI变化都具有明显的季节规律。自然植被(林地和草地)的NDVI年变化曲线表现出显著的单峰型,在夏季,这两类的NDVI达到了峰值。而农业植被(水田和旱地)的NDVI年变化曲线表现出双峰,第一个峰值一般出现在5月,第二个峰值大约出现在8月,而在6月左右NDVI有一个明显的降低,这主要是由于冬播作物的收获引起的。

(2) 农业植被的生长开始期一般要早于自然植被,水田和旱地的生长开始期约在2月末至3月中旬,林地的生长开始期多位于3月末,草地的生长开始期在4月中旬左右。草地生长结束期约在10月初,生长季长度约为5个多月;林地的生长结束期在12月初,其生长季长度大都在250天以上。农业植被的生长结

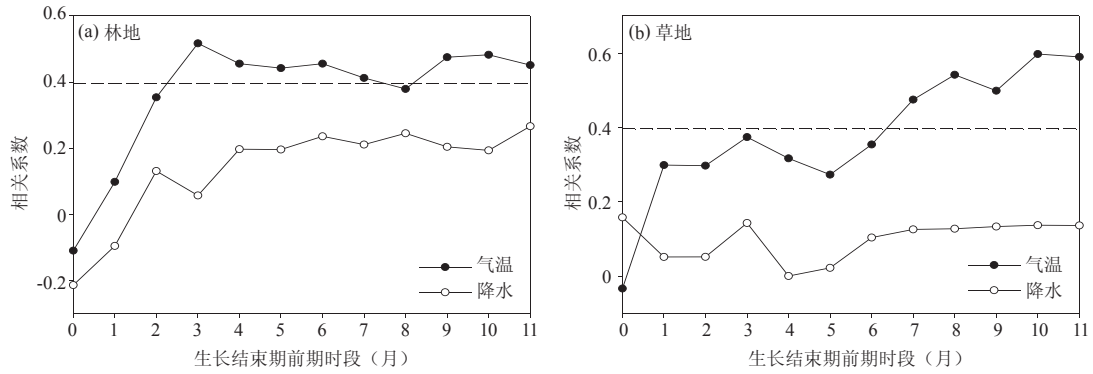


图11 生长季长度与气温、降水的关系 (虚线表示0.05显著性水平)

束期一般位于10月末, 生长季长度也相对较长, 多在230到250天左右。

(3) 1982—2006年间, 植被物候发生显著变化的土地利用类型包括: 林地的生长季长度延长了 $11.3\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ; 草地的生长开始期提前了 $6.4\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ , 生长季长度延长了 $7.2\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ; 有灌溉旱地的生长开始期提前了 $5.8\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ , 生长结束期提前了 $11.6\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。

(4) 引起植被物候发生显著变化的主要气候因素是气温, 降水的作用不明显。草地生长开始期的变化主要受生长开始期的前一个月(3月)的气温的影响, 其生长季长度的增加也与生长开始期前期的升温有关。有灌溉旱地生长开始期的变化主要受生长开始期当月(2月)气温的影响, 其生长结束期的变化与生长开始期的变化、生长开始期初期气温的变化有关。林地生长结束期前的第3~11个月的各月的平均气温都会对生长季长度产生影响。

## 6 讨论

根据本研究的结果, 虽然不同类型植被的生长开始期基本上都有所提前, 然而只有分布于北部区域的两种土地类型(草地和有灌溉旱地)的植被生长开始期的提前通过了显著性检验, 这表明, 气温上升对北部区域植被物候的改变更为明显。Piao等<sup>[12]</sup>对中国温带区域的物候变化分析也显示, 中国北方区域的植被物候变化幅度要明显高于本研究中长江以南区域植被物候的变化幅度。这说明了气候变暖对中国不同区域植被物候的影响可能具有明显的纬向分异特征。但考虑到研究的空间尺度问题, 使用更高分辨率的植被数据可能会得出更有说服力的结论。

本研究中草地和有灌溉旱地的生长开始期的明显提前显然受到了华北地区冬春季显著变暖的影响, 然而, 二者的生长结束期和生长季长度却呈现相反的变化趋势。另外, 皆分布于南部区域的林地和水田的生长季长度的变化趋势也呈现出相反的趋势, 尽管水田

的生长季长度变化并不显著。在具有基本一致的气候变化趋势的区域内, 植被物候变化的差异, 明显不能用气候因素来解释。对于农业植被, 尤其是农作物而言, 人为活动的参与及其对物候产生的影响是不可忽视的。已有研究发现, 施肥的增加可能会导致生长开始期提前来临<sup>[44]</sup>, 将人为因素和气候对植被物候的影响分离开来是值得进一步关注的问题。

除了人为因素的影响外, 林地、草地等自然植被大都属于多年生植物, 而农作物一般为一年生植物, 多年生和一年生植物在生理机制上对气候的响应差异可能也会影响到其生长季长度的改变, 这需要进一步的研究。

## 参考文献

- [1] Kemp P R, Gardetto P E. Photosynthetic pathway types of evergreen rosette plants (Liliaceae) of the Chihuahuan desert. *Oecologia*, 1982, 55: 149-156.
- [2] Menzel A. Phenology: Its importance to the global change community. *Climatic Change*, 2002, 54: 379-385.
- [3] Schwartz M D. Phenology: An integrative environmental science. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [4] Julien Y, Sobrino J A. Global land surface phenology trends from GIMMS database. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30: 3495-3513.
- [5] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397: 659.
- [6] Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 76-81.
- [7] Schwartz M D, Chen X. Examination of the onset of spring in China. *Climate Research*, 2002, 21: 157-164.
- [8] Lu P L, Yu Q, Liu J D, et al. Effects of changes in spring temperature on flowering date of woody plants across China. *Botanical Studies*, 2006, 47: 153-161.
- [9] Mearns L O, Rosenzweig C, Goldberg R. Mean and variance change in climate scenarios: Methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. *Climatic Change*, 1997, 35: 367-396.
- [10] Bradley N L, Leopold A C, Ross J, et al. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96: 9701-9704.
- [11] Beaubien E G, Freeland H J. Spring phenology trends in Alberta, Canada: Links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 53-59.
- [12] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12: 672-685.

- [13] Zeng B, Yang T B. Natural vegetation responses to warming climates in Qaidam Basin 1982-2003. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30: 5685-5701.
- [14] 国志兴, 张晓宁, 王宗明, 等. 东北地区植被物候期遥感模拟与变化规律. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 165-172.
- [15] 宋春桥, 游松财, 柯灵红, 等. 藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2012, 32(4): 1045-1055.
- [16] Studer S, Stöckli R, Appenzeller C, et al. A comparative study of satellite and ground-based phenology. *International Journal of Biometeorology*, 2007, 51:405-414.
- [17] Ricotta C, Avena G C. The remote sensing approach in broadscale phenological studies. *Applied Vegetation Science*, 2000, 3:117-122.
- [18] White M A, Hoffman F, Hargrove W W. A global framework for monitoring phenological responses to climate change. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(L04705), doi: 10.1029/2004GL021961.
- [19] Heumann B W, Seaquist J W, Eklundh L, et al. AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108: 385-392.
- [20] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, 20: 503-510.
- [21] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7: 1417-1434.
- [22] Rasmussen M S. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: Reduction of environmental and inter-annual variability. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18: 1059-1077.
- [23] Karlsen S R, Elvebakk A, Høgda K A, et al. Satellite-based mapping of the growing season and bioclimatic zones in Fennoscandia. *Global Ecology and Biogeography*, 2006, 15: 416-430.
- [24] Guerschman J P, Paruelo J M, Burke I C. Land use impacts on the Normalized difference vegetation index in temperate Argentina. *Ecological Applications*, 2003, 13: 616-628.
- [25] Groten S M E, Ocatre R. Monitoring the length of the growing season with NOAA. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23: 2797-2815.
- [26] Reed B C, Brown J F, VanderZee D, et al. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5: 703-714.
- [27] Paruelo J M, Lauenroth W K. Inter-annual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography*, 1998, 25: 721-733.
- [28] Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 20069-20083.
- [29] Slayback D, Pinzon J E, Los S O, et al. Northern Hemisphere photosynthetic trends 1982-99. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1-15.
- [30] Pant M. Response of vegetation phenology to rainfall timing in the Sahel 1982-2004. Netherlands: MSc thesis, Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), 2008.
- [31] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40: 1824-1832.
- [32] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT—A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 2004, 30: 833-845.
- [33] Viovy N, Arino O, Belward A S. The Best Index Slope Extraction (Bise) — A method for reducing noise in NDVI time-series. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13: 1585-1590.
- [34] Andres L, Salas W A, Skole D. Fourier-analysis of multitemporal AVHRR data applied to a land-cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 1115-1121.
- [35] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 1964, 36 (8): 1627-1639.
- [36] Chen J, Jönsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 332-344.
- [37] Fontana F, Rixen C, Jonas T, et al. Alpine grassland phenology as seen in AVHRR, VEGETATION, and MODIS NDVI time series—a comparison with in situ measurements. *Sensors*, 2008, 8: 2833-2853.
- [38] 侯学煜, 孙世洲, 张经纬, 等. 中华人民共和国植被图. 北京: 地图出版社, 1979.
- [39] Liu J, Tian H, Liu M, et al. China's changing landscape during the 1990s: Large-scale land transformations estimated with satellite data. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L02405, doi:10.1029/2004GL021649.
- [40] Anderson J R, Hardy E E, Roach J T, et al. A land use and land cover classification system for use with remotely sensed data. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1976(964).
- [41] U.S. Geological Survey. Land use and land cover digital data from 1:250,000-and 1:100,000-scale maps—Data users guide 4. Virginia: U.S. Geological Survey, 1990.
- [42] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 基于NDVI数据的华北地区耕地物候空间格局. *中国农业科学*, 2009, 42(2):552-560.
- [43] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 701-716.
- [44] Chau A, Heinz K M, Davies F T. Influences of fertilization on population abundance, distribution, and control of *Frankliniella occidentalis* on chrysanthemum. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2005, 117: 27-39.

## 下期要目：“现代天气业务”专辑

- ◆ 我国现代天气业务现状及未来发展趋势
- ◆ 我国精细化气象要素客观预报发展
- ◆ 我国强对流天气监测和预报业务
- ◆ 定量降水预报技术研究进展
- ◆ 我国台风业务现状及其关键技术
- ◆ 我国海洋气象预报业务现状与发展
- ◆ 我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势